

## インターネットを介した力帰還型バイラテラル遠隔操作

藤本 英雄\*<sup>1</sup> 佐野 明人\*<sup>1</sup> 岡本 啓史\*<sup>2</sup>

## Force-Reflecting Bilateral Teleoperation Through the Internet

Hideo Fujimoto\*<sup>1</sup>, Akihito Sano\*<sup>1</sup> and Keiji Okamoto\*<sup>2</sup>

Force-reflection is considerably essential in the complex teleoperations. This study aims to develop the practical force-reflecting teleoperators through the Internet, and supposes the time delay on the order of several hundred milliseconds. Since the transmission delays exist in network vary rapidly and possibly randomly, it is very difficult to ensure the stability. Accordingly, in this paper, the time-varying controllers which are adjusted to the round trip time delay observed on-line is designed based on the framework of the  $H_\infty$  gain-scheduling. This control strategy can achieve higher performance in the face of large variations in operating conditions. Furthermore, both communications protocol and compression of image data are investigated from the networked robotic point of view. The validity of proposed method is demonstrated by experiments of the bilateral teleoperation through the Internet.

**Key Words:** Master-Slave System, Internet, Bilateral Teleoperation, Force-Reflection,  $H_\infty$  Control Theory

## 1. はじめに

遠隔地で作業する際の力感覚をオペレーターにしながらにして得ることができ、離れた場所から物を操作したり作り出すことができれば、様々な可能性が広がる。従来から対象とされてきた領域としては、人間が容易に近づけない場所での遠隔極限作業といった非常に特別なミッションである。例えば、宇宙空間での作業 [1]、あるいは深海での作業 [2] などが挙げられる。これらは、通信遅れが数秒オーダーになり、スレーブ側にかなり高い自律性が要求される。

最近、コンピュータネットワークを活用したテレロボティクス技術が議論され始めている [3]。ネットワークを介した遠隔操作については、1992 年ごろから日本のグループによって、先駆的な実験がいくつか行われてきている [4]~[7]。将来、遠隔外科手術など我々の生活に直接かわる領域での利用が期待されている。今日の情報インフラは、すでになくはならない存在であるが、単なる音声や画像情報のやり取りでは対処できない問題が必ず表面化してくる。そのとき、実世界とのインタラクションを可能とするテレロボティクス技術 [8] が問題解決のキーテクノロジーとなる。

実際に遠隔操作する場合、通信遅れによる不安定現象が最大の問題となる。マスタスレーブシステムが専用の通信回線で接

続され、通信遅れが向きによらずほぼ一定であれば、Anderson と Spong [9] が提案したスキュアリング変換を用いて、通信部が受動性を満たす安定な制御系が構成できる。しかし、ネットワーク通信では、回線負荷の変化やパケット再送などにより遅れ時間が変動し、通信部では向きによっても遅れ時間が異なる。したがって、時変システムとなるために、スキュアリング変換を用いても安定性が保証されないことがあり、現在その対策が検討されている [10]。Niemeyer と Slotine は、彼らの提唱するウェーブ変数の概念を拡張し、この問題に対する一つの解決策を導いている [11]。

制御理論の分野で注目されている  $H_\infty$  制御や  $\mu$ -解析・設計は、バイラテラル制御系の解析・設計ツールとして非常に有効である [12]。Leung と Francis らは [13]、通信部の遅れ要素を摂動とみなして、ロバスト安定性を考えることで、遅れ補償が可能であることを示した。筆者らは、Leung らの方法が、通信遅れが変動する場合にも有効で、かつ制御性能（操作性）を考慮した設計が可能であると考え、具体的な設計法の提案と基礎実験を重ねてきた。まず、通信遅れが一定の場合について、 $H_\infty$  制御理論に基づくバイラテラル制御系設計を行った [14]。次いで、通信遅れが変動する場合について制御系設計を行い、研究室内で模擬した遅れのもと実験を行い、設計手法の有効性を示した [15]。本研究では、インターネットを介した遠隔操作の実証実験を目的とする。

バイラテラル制御されたマスタスレーブシステムでは、人間がマスタを操作することで、作業環境に配置したスレーブにその動作指令を伝え、さらにスレーブと環境との干渉力がマスタ

原稿受付 1999 年 6 月 1 日

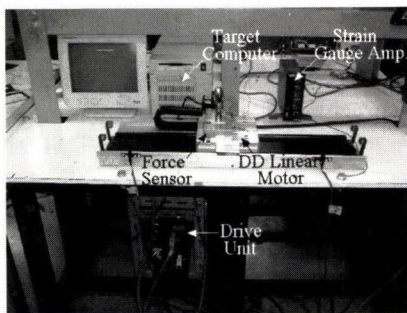
\*<sup>1</sup>名古屋工業大学\*<sup>2</sup>松下通信工業(株)\*<sup>1</sup>Nagoya Institute of Technology\*<sup>2</sup>Matsushita Communication Industrial Co., Ltd.

を介して操作者に伝えられる。この力覚情報は、作業を行う上で非常に重要であり、遠隔臨場感を達成するには欠くことができない。本論文では、仮想環境を介さず、直接力覚が帰還させられるバイラテラル制御系の構築を行う。2章では、ローカルサイトおよびリモートサイトに設置されたマスタスレーブ型の遠隔操作システムの構成について述べる。3章では、数百 [msec] (1秒以下) の通信遅れを想定し、 $H_\infty$  制御理論に基づいて、ゲインスケジューリングの枠組みの中で、力帰還型バイラテラル制御系の設計を行う。4章では、UDP/IP による制御データの伝送および JPEG 方式を使った画像データの圧縮・伝送について述べる。5章では、インターネットを介した遠隔操作実験について述べ、提案する力帰還型バイラテラル遠隔操作システムの有効性を示す。

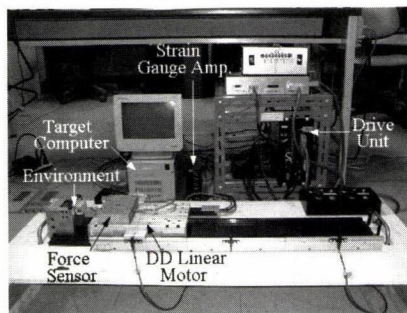
## 2. 遠隔操作システム

Fig. 1 は、直動型 DD モータ (日本精工 (株), YA シリーズ) を用いたマスタシステム (Fig. 1 (a)) およびスレーブシステム (Fig. 1 (b)) の全景である。マスタシステムはローカルサイトである本学研究室に設置されており、スレーブシステムは約 50 [km] 離れたリモートサイトである岐阜県工業技術センターに設置されている。

マスタおよびスレーブの質量は、それぞれ 4.5 [kg] および 6.5 [kg] である。また、粘性摩擦係数は、19.95 [Ns/m] および 19.14 [Ns/m] であり、比較的低摩擦となっている。さらに、外部環境としては、 $4.9 \times 10^3$  [N/m] の剛性を有するばねに連結された壁を用意した。本研究では、操作者がマスタに加える力 (操作力) およびスレーブが外部環境から受ける力 (反力) を得るために、連結丸穴タイプのカセンサを自作し使用した。ま



(a) Master system (local site)



(b) Slave system (remote site)

Fig. 1 Teleoperation system (experimental setup)

た、位置検出を行うリニアレゾルバの分解能は 1 [ $\mu$ m] である。モータの駆動には、力制御モードに設定された専用のドライブユニットを使用し、推力指令値が D/A 変換器を介してドライブユニットに送られる。

本研究では、リアルタイム OS である Tornado (Wind River Systems, Inc., VxWorks) を採用した。ローカルサイトに Tornado 開発環境用のホストコンピュータ (PentiumII, 300 [MHz]) ならびにマスタ制御用ターゲットマシン (MMX Pentium, 200 [MHz]) を置き、リモートサイトにスレーブ制御用ターゲットマシン (Pentium, 166 [MHz]) を設置した。

Fig. 1 に含まれていないが、視覚システムとしては、リモートサイトの作業領域の画像を小型 CCD カメラ ((株) エルモ社, UN411) で捕え、コンピュータ (PentiumII, 300 [MHz]) 内のカラートラッキングビジョン (富士通 (株), TRV-CPW5) に取り込む。ローカルサイトには、画像提示用コンピュータ (Pentium, 90 [MHz]) が設置されている。OS はいずれも Windows 95 である。

なお、次のようなソフトウェア構成を採っている。制御系に関しては、Tornado でサポートしている C++ を用いており、画像系に関しては、Windows 上で Visual C++ (Version 4.0) を用いている。

## 3. 力帰還型バイラテラル制御系設計

### 3.1 通信部を有するバイラテラル制御系とその設計方針

Fig. 2 は、本研究で考えている三つの補償器を備えたバイラテラル制御系である。点線で囲まれた部分が通信部 (伝送経路) を表し、通信遅れを表すむだ時間要素が入っている。スレーブからマスタへの通信遅れを  $T_1$  [s] とし、マスタからスレーブへの遅れを  $T_2$  [s] とする。

$P_m$  および  $P_s$  は、マスタおよびスレーブの動特性であり、次に示すような伝達関数で表される。

$$P_m = \frac{1}{M_m s + Q_m}, \quad P_s = \frac{1}{M_s s + Q_s} \quad (1)$$

ここで、 $M_m$  および  $M_s$  は、それぞれマスタおよびスレーブの質量であり、 $Q_m$  および  $Q_s$  は各粘性摩擦係数である (2章参照)。また、 $S_e$  は外部環境の特性であり、 $S_e = K_e/s$  とする。

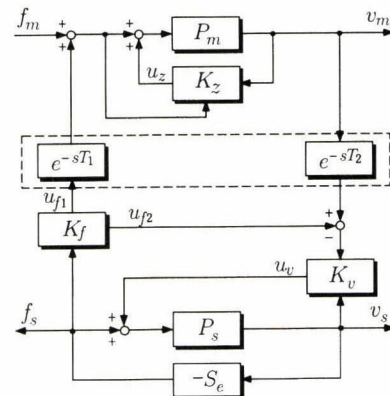


Fig. 2 Bilateral system with communication channel

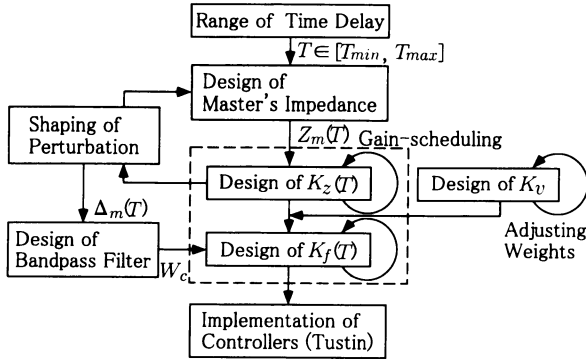


Fig. 3 Design algorithm of controllers

ただし、 $K_e$  は環境のばね剛性である。 $f_m$  および  $f_s$  は、それぞれ操作力および反力である。また、 $v_m$  および  $v_s$  は、マスタおよびスレーブの速度である。伝送される制御データは、動作指令としてのマスタの速度  $v_m$  および力帰還のための反力  $f_s$  (正確には  $u_{f1}$ ) である。

補償器  $K_z$  は、マスタの動特性を調整するインピーダンス制御器である。補償器  $K_v$  は、マスタとスレーブの速度の一致を図る速度制御器である。また、補償器  $K_f$  は、反力  $f_s$  を帰還させ、通信遅れによる不安定性を補償する制御器である。

さて、Fig. 2 に示す通信部がインターネットなどの場合、ネットワーク負荷により通信遅れが変動する。このとき、最大遅れ時間までデータを仮想的に遅らせ、その最大遅れに対して時不変補償器を設計する方法が考えられる。しかし、仮に数百 [msec] の範囲内で通信遅れが変動する可能性があるとしたら、安全のために 1 秒程度の遅れに設定せざるを得ない。この場合、保守的な制御系になり制御性能を上げることができない。

本研究では、摂動とみなした遅れ要素に対してロバスト安定性を考える文献 [13] の通信遅れ補償方法をベースとしている。本論文では、通信遅れが一定の場合を扱った文献 [14] の手法を発展させ、変動する通信遅れに対して、時変補償器をゲインスケジューリングの枠組みを適用して設計する。また、マスタを可変インピーダンス制御することによって、変動範囲内での見かけの摂動を同程度に小さく抑え、よりタイトな設計を可能とする。さらに、これまで、往復の通信遅れを 0.2 秒までとしていたが、1 秒以内の通信遅れをカバーできるように拡張する。Fig. 3 に設計手順の概要をフローチャートで示した。具体的な制御系設計については、次節以降で詳しく述べる。

### 3.2 摂動を考慮した可変インピーダンス制御

Fig. 2 において、復路側 (マスタ → スレーブ) に遅れ要素をまとめると、この往復の遅れ要素  $e^{-sT}$  ( $T = T_1 + T_2$ ) は、Fig. 4 (a) に示すように、システムへの摂動  $\Delta_T(s)$  として影響する。

$$\Delta_T(s) = e^{-sT} - 1 \quad (2)$$

図中の  $G_m$  は、マスタ側のブロックをまとめたものであり、次のような伝達関数で表される。

$$G_m = \frac{P_m(K_{zf} + I)}{I - P_m K_{zv}} \quad (3)$$

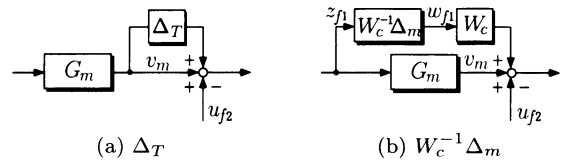


Fig. 4 Perturbation model of time delay

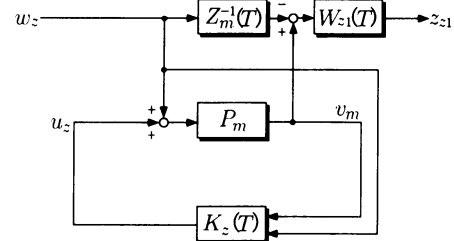


Fig. 5 Generalized plant for  $K_z(T)$

ただし、 $K_{zf}, K_{zv}$  は、おのおの入力  $f_m + u_{f1}, v_m$  に対する  $K_z$  の特性である。

しかし、 $\Delta_T$  では、本来の時間遅れではなく、ノルム 2 以下のすべての摂動を補償することになってしまうので、次に示す  $\Delta_m$  を考える。

$$\Delta_m = \Delta_T G_m \quad (4)$$

このとき、次のようなバンドパスフィルタ  $W_c$  が存在する。

$$\|W_c^{-1} \Delta_m\|_\infty < 1 \quad (5)$$

ここで、 $\Delta_m = W_c W_c^{-1} \Delta_m$  と表せば、Fig. 4 (b) が得られる。今、摂動は  $W_c^{-1} \Delta_m$  となり、1 未満のノルムを持つことになる [13]。

定義式 (4) から分かるように、摂動  $\Delta_m$  は通信遅れの増加とともに大きくなるが、 $G_m$  の動特性を調整することで  $\Delta_m$  を小さく抑えることができる。摂動が小さく抑えられれば、よりタイトな設計が可能となる。具体的には、目標インピーダンスを次のように定義し  $G_m$  の調整を行う。

$$Z_m(T) = \alpha M_m s + \beta(T) Q_m \quad (6)$$

さて、往復の通信遅れ  $T$  が、動作中に次の範囲で変化するものとする。

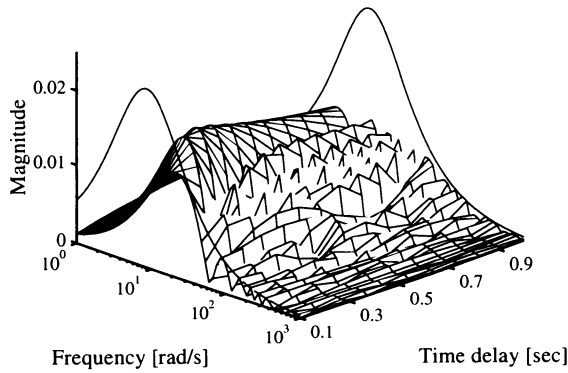
$$T \in [0.1, 1.0] \quad (7)$$

この変動範囲内で、摂動が同程度に小さく抑えられるように、 $\alpha$  を 1.0 に固定し、 $\beta$  を通信遅れに応じて次のように増大させる。

$$\beta(T) = 7.5T + 3.5, \beta \in [4.25, 11] \quad (8)$$

本研究では、 $H_\infty$  制御理論に基づき、モデルマッチングの手法で、可変インピーダンスを実現する補償器を求める。Fig. 5 に一般化制御対象を示す。制御量および外生信号は次のとおりである。

$$z_z = \begin{bmatrix} W_{z1}(T)\{v_m - Z_m^{-1}(T)w_z\} \\ W_{z2}u_z \end{bmatrix}, w_z = f_m + u_{f1} \quad (9)$$

Fig. 6  $\Delta_m(T)$  and  $W_c$ 

ここで、 $W_{z2}u_z$  は、 $u_z$  を重み関数を通して制御量としてとったものであり、Fig.5 では省略してある。重み関数  $W_{z1}$  および  $W_{z2}$  は、次のように設定する。

$$W_{z1}(T) = \frac{\rho_z \times Z_m(T)}{s + 10^{-4}}, \quad W_{z2} = \frac{6 \times 10^2 s}{s + 10^6} \quad (10)$$

$W_{z2}$  は推力を高周波域で抑えるように設定してあり、また、目標インピーダンスをなるべく高周波域まで達成できるように、 $W_{z1}$  中の設計パラメータ  $\rho_z$  を使って調整する。以上の設定により、ゲインスケジュールド  $H_\infty$  補償器を、制御系設計 CAD (MATLAB) の LMI Control Toolbox に用意された関数 hinfgs を用いて求めた。得られた補償器の次数は 4 次である ( $\rho_z = 98$ )。Fig. 6 は、 $\Delta_m(T) (= \Delta_T(T)G_m(T))$  を図示したものである。図から分かるように、変動範囲内で摂動が同程度に小さく抑えられている。

### 3.3 通信遅れ補償と力覚の帰還

本節では、与えられた摂動に対して、ロバスト安定化補償器  $K_f$  を設計する。Fig. 7 に一般化制御対象を示す。 $G_s$  は、 $K_v$  により速度制御されたスレーブ  $P_s$  と外部環境  $S_e$  を合わせた動特性である。

$$G_s = \frac{S_e P_s K_{vm}}{(K_{vs} - S_e)P_s - I} \quad (11)$$

ここで、 $K_{vm}, K_{vs}$  は、おのこの  $v_m - u_{f2}, v_s$  に対する  $K_v$  の特性である。ただし、 $K_v$  の具体的な設計法に関しては、紙面の都合上省略する (文献 [14] 参照)。可変要素  $G_m(T)$  はアフィンに入り、 $K_f(T)$  をゲインスケジューリングの枠組みで同様に求めることができる。

補償器  $K_f$  による閉ループ系が安定であるための十分条件は、スモールゲイン定理より次式で表される。

$$\|W_c^{-1} \Delta_m Q\|_\infty < 1 \quad (12)$$

ここで、 $Q$  は  $w_{f1}$  から  $z_{f1}$  までの伝達関数である。また、制御量  $z_{f2}$  および  $z_{f3}$  は、それぞれ反力  $f_s$  がマスタ側に帰還されるようにと、マスタの速度  $v_m$  と帰還力  $u_{f1}$  との間の特性が、次のモデル伝達関数  $S_M$  に一致するように導入した。

$$S_M = \frac{K_e}{s + 10^{-3}} \quad (13)$$

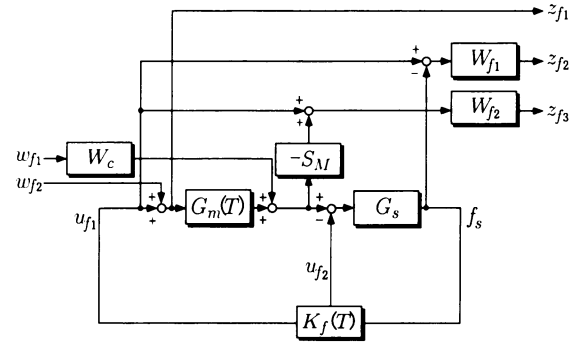
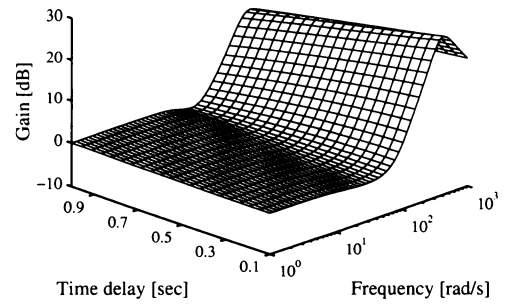
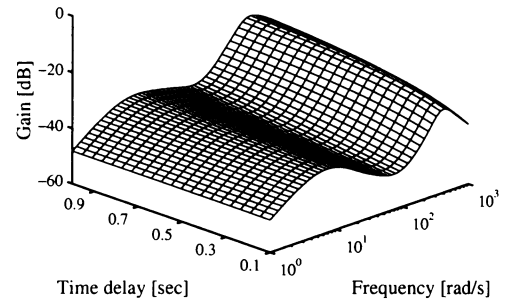
Fig. 7 Generalized plant for  $K_f(T)$ (a)  $K_{f1}(T)$ (b)  $K_{f2}(T)$ 

Fig. 8 Gain characteristics of controller

さらに、Fig. 7 では省略してあるが、 $u_{f1}, u_{f2}$  を重み関数を通して制御量  $z_{f4}, z_{f5}$  とした。制御量および外生信号をまとめると次のとおりである。

$$z_f = \begin{bmatrix} w_{f2} + u_{f1} \\ W_{f1}(u_{f1} - f_s) \\ W_{f2}(u_{f1} - S_M v_m) \\ W_{f3} u_{f1} \\ W_{f4} u_{f2} \end{bmatrix}, \quad w_f = \begin{bmatrix} w_{f1} \\ f_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.2 節で得られた  $\Delta_m(T)$  に対して、バンドパスフィルタ  $W_c$  を次のように設定した。

$$W_c(s) = \frac{1.82s}{(4.28s + 50)(s + 6.5)} \quad (15)$$

Fig. 6 に  $W_c$  のゲイン特性を示したが、図から分かるように、設定した変動範囲で、式 (5) の関係を満たしている。また、出

力重み関数に関しては、次のように設定した。

$$W_{f1} = \frac{\rho_{f1}}{s + 10^{-4}}, \quad W_{f2} = \frac{\rho_{f2}(s + 10^{-3})}{s + 10^{-4}} \quad (16)$$

$$W_{f3} = \frac{2.5 \times 10^4 s}{s + 10^6}, \quad W_{f4} = 40 \quad (17)$$

$W_{f3}, W_{f4}$  で高周波域での出力を抑制し、設計パラメータを含む  $W_{f1}, W_{f2}$  を使って制御性能の周波数整形を行う。この一般化制御対象に対し、ゲインスケジューリング手法を用いて補償器  $K_f(T)$  を設計した ( $\rho_{f1} = 8, \rho_{f2} = 0.06$ )。Fig. 8 にゲイン特性を示す。ただし、 $K_{f1}, K_{f2}$  は、おののおの  $u_{f1}, u_{f2}$  に対する  $K_f$  の特性である。また、補償器の次数は 15 次である。得られた三つの補償器は、サンプリングタイム 0.5 [msec] で双一次変換 (Tustin) により離散化し、2 章で述べたターゲットマシンに実装した。

#### 4. 制御データおよび画像データの伝送

本研究では、制御データと画像データは独立した系で処理・伝送されている。現在、ネットワーク通信の分野では、通信品質 (QoS: Quality of Service) について盛んに研究がなされている。今後、ネットワークロボティクスでも、安定性、操作性などの品質を高めるための通信制御が必要になってくる [16]。

##### 4.1 制御データの伝送

インターネット上の通信の基礎としてソケットが知られている [17]。これを用いたトランスポート層の通信方式として、TCP と UDP がある。TCP は、リライアブル (順序付け・誤り制御機能) な全二重のバイトストリームを提供するコネクション指向のプロトコルである。一方、UDP は、コネクションレスのプロトコルであり、UDP のデータグラムが設定した相手に届くかは保証されていない。

TCP は、信頼性を提供するために、確認応答に基づく再転送を行っており、これが輻輳<sup>†</sup>を悪化させる要因にもなっている [18]。輻輳が生じると、それを避けるために倍数減少輻輳回避およびスロースタートといった処理動作が行われ、これによりさらに遅延の増大を招く。バイラテラル制御では、安定性を保証し、さらに操作性を維持するためには、可能な限り通信遅れを小さくする必要がある。そこで、TCP のような複雑な制御動作を行わない UDP の適用が妥当と考えられる。本研究では、制御データの伝送に UDP/IP を採用する。

本節では、パケットロスおよび伝送速度について調べてみた。なお、制御データとして、ローカルからリモートへ  $v_m$  (4 [byte])、リモートからローカルへ  $u_{f1}$  (4 [byte]) がそれぞれ伝送される。これら制御データは、サンプリング周期 (2048 [Hz]) ごとに生成されており、複数データまとめてパケットで送信する。実験では、次に示す 6 通りについて調べる。カッコ内の数値は伝送周期である。

15(137 [Hz]), 10(205), 7(293), 5(410), 4(512), 3(683)

本研究では、往復の通信遅れ  $T$  を求める必要があるので、各

<sup>†</sup>輻輳とは、一つ以上の交換地点 (例えばルータ) において、データグラムの過負荷により致命的な遅れが生じた状態のことである。ルータの許容量を越えるとデータグラムが廃棄され、パケットロスが生じる。

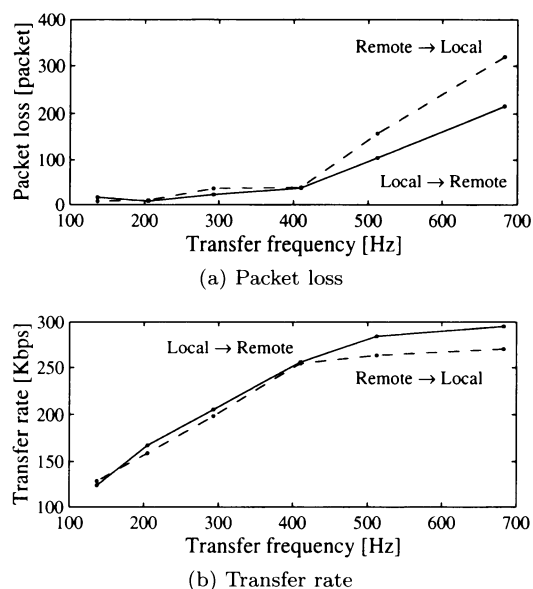


Fig. 9 Quality of transmission

パケットにタイムスタンプを付加して送信し、相手サイトでそれを返送してもらい、到着したタイムスタンプの値と到着時刻から  $T$  を求める。したがって、パケットには二つのタイムスタンプ用データ (2×4 [byte]) が乗っている。実際は、制御データ、タイムスタンプに加え各種ヘッダが付加される。

Fig. 9 に送信周期とパケットロスおよび伝送速度の関係の一例を示す (約 1.7 秒間送信)。ただし、受信周期は 2,048 [Hz] であり、送受信のバッファサイズは 4,096 [byte] である。まず、Fig. 9 (a) において、実線がローカルからリモート、破線がリモートからローカルに送信した場合のパケットロスである。図から分かるように、伝送周期が 410 [Hz] までは、パケットロスが抑えられているが、それよりも高い周波で伝送すると、パケットロスが急激に増大する。また、通信の向きによってロスが異なっている。次に、そのときの実際の伝送速度 (スループット) を Fig. 9 (b) に示す。図から分かるように、410 [Hz] あたりで伝送速度が頭打ちになっている。また、伝送速度も向きによって差がでている。

これらの結果は、ネットワーク負荷によっても異なってくるので、最適な伝送周期を導出するのは難しい。しかし、パケットロスが多いことは輻輳の悪化を意味し、公共性の高いインターネットを利用する上では問題がある。一方で、高い伝送速度を確保することが望まれる。そこで、5 章の実験では、伝送周期を 410 [Hz] に設定した。

最後に、受信データと制御について考察しておく。本研究では、制御周期を 2,048 [Hz] に設定している。通信遅れの変動およびパケットロスにより、次の二つの状態が生じる。

1. 通信遅れが増大する場合は、補償器に入力すべき最新のデータがなくなる。パケットロスでも同様の問題が生じる。
2. 通信遅れが減少する場合は、バッファ内にデータが蓄積し、処理待ち状態となる。

本研究では、1. に関しては、直前の制御データをコピーして用いることとし、2. に関しては、上書きを行わず、多少遅れが増

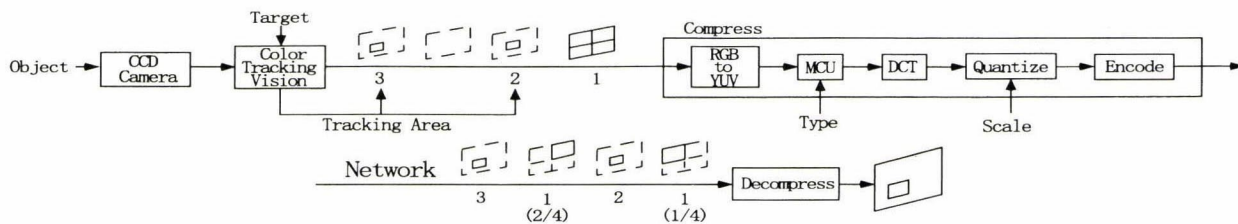


Fig. 10 Block diagram of compression and transmission of image data

すが、制御データの連続性を重視した。

#### 4.2 画像データの圧縮・伝送

本研究では、リモートサイトの CCD カメラで捕えた作業領域の画像に対して、作業内容に応じて重要だと思われるエリアを操作者が指定する。このエリアは、カラー-trackingビジョンを用いて常にtrackingされている。視線検出によるエリア設定も考えられるが、ハードウェアなどの理由から今回は採用しなかった。

次に、このtrackingエリアの内側と外側で「画質」および「画像更新周期」が指定できるようにする[19]。注目しているエリア内を高画質・高更新周期とし、これにより、作業において重要な部分をはっきり速い動きで観測する。これに対して、エリア外は注視していないことから、低画質・低更新周期でも問題なく、これにより情報量を低減する。

Fig. 10 に提案する画像の圧縮・伝送方式の概略図を示す。この図を使って処理過程を簡単に述べる。本研究では、画像圧縮方式として JPEG アルゴリズムを採用した[20]。以下に述べる間引きタイプおよび量子化テーブルのパラメータをtrackingエリアの内外で変えることで、それぞれの画質および画像の圧縮率を制御する。まず、カラー-trackingビジョンのメモリ上の RGB データを YUV データに変換する。次に、MCU (Minimum Coded Unit) を生成するが、その際、間引きのタイプ (Type) を変える。さらに、得られた MCU のそれぞれの  $8 \times 8$  ブロックを DCT (離散コサイン変換) し、量子化、ハフマン符号化の処理を経て圧縮データを得る。量子化過程において、量子化テーブルの値 (Scale) を変化させることで画質を制御できる。

画像データの伝送方法は単純で、1 フレームの画像を分割 (Fig. 10 では 4 分割) して、その分割した個々の画像とtrackingエリア内の画像を交互に送ることにより、エリア内の更新周期を相対的に上げている。また、画像データの伝送では高い信頼性が要求されるので TCP/IP を採用し、ウィンドウズ・ソケット (Winsock) を用いた。

実験では、まずリモートサイトから作業領域の静止画像がローカルサイトに送信される。この参照画像を基にtrackingエリアを指定すると、その位置情報がリモートサイトに送信され、画像の圧縮・伝送を開始する。Fig. 11 に受信した画像の例を示す。図中の四角く囲まれた部分がtrackingエリアで、スレーブ先端に取り付けられている。エリア内外の画質の差が分かりづらいが、得られたスペックを Table 1 に示す。

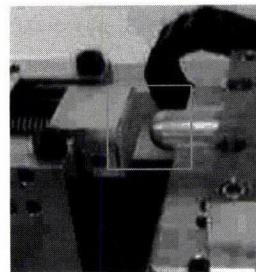


Fig. 11 Visual information

Table 1 Specifications (image size:  $256 \times 256$ )

| Tracking Area | Pixel Resolution | Compression Rate | Transfer Rate (fps) |
|---------------|------------------|------------------|---------------------|
| Inside        | $80 \times 80$   | 75.9 (0.8 [KB])  | 2.0                 |
| Outside       | $256 \times 256$ | 14.6 (2.4 [KB])  | 0.5                 |

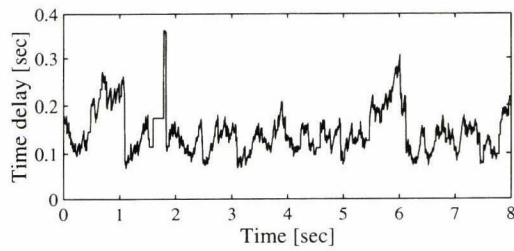
## 5. 遠隔操作実験

### 5.1 操作実験

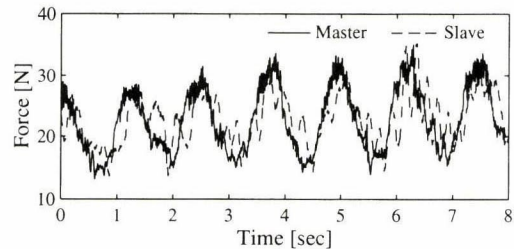
まず、ステップ状の位置決め動作を繰り返し行った。自由運動下 ( $f_s = 0$ ) では、 $K_f$  は動作しないのでマスタとスレーブは直列接続状態となり、通信遅れによる不安定現象は生じない。そこで、通信遅れに関係なく  $\beta$  を式 (8) の 4.25 に固定した。変動する通信遅れの影響があるものの、マスタとスレーブの位置追従は良好であった。また、マスタの粘性が下限値に設定してあるので操作性も良かった。

次に、外部環境 (壁) への押し付け動作を行った。Fig. 12 および Fig. 13 に代表的な実験結果を示す。Fig. 12 は比較的通信遅れが小さい場合であり、Fig. 13 は比較的大きい場合である。ただし、Figs. (a) は通信遅れの変化を示しており、Figs. (b) は力の時間変化を示している。実線は操作力  $f_m$  を、破線はスレーブが壁に及ぼした力  $-f_s$  を示している。

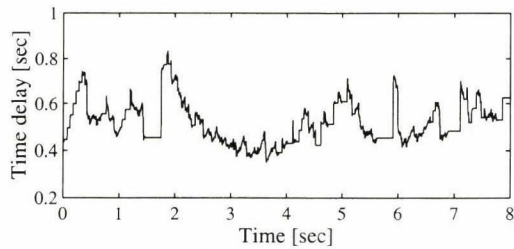
Figs. (a) の比較から分かるように、通信遅れに関しては、ネットワーク負荷により実験ごとに通信遅れの平均値がかなり異なる。しかも、わずか 8 秒間の実験で通信遅れが激しく変動し、そのパターンも様々である。次に、Figs. (b) から分かるように、通信遅れの激しい変動があるにもかかわらず、不安定な現象は起こらず、安定な押し付け動作を行うことができている。特に、Fig. 13 の場合は、かなり通信遅れがあるにもかかわらず、十分満足いく応答性を示しており、操作性が極端に低下した感じはなかった。



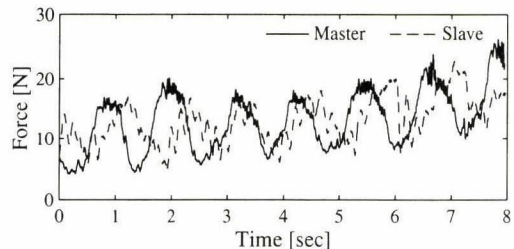
(a) Variation of time delay



(b) Variation of forces

Fig. 12 Experimental result when pushing a wall ( $T: 0.1 \sim 0.4$ )

(a) Variation of time delay

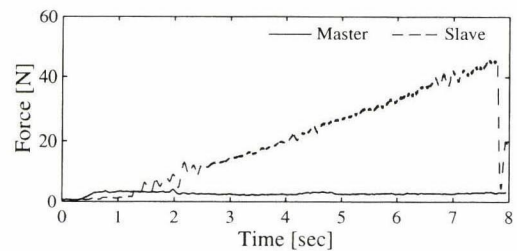


(b) Variation of forces

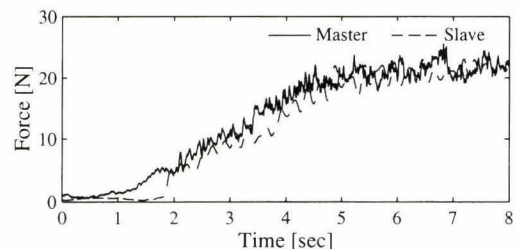
Fig. 13 Experimental result when pushing a wall ( $T: 0.4 \sim 0.8$ )

## 5.2 把持実験

壁とスレーブの間に生卵を挟む形で把持実験を行った。Fig. 14 に実験結果を示す。また、Fig. 15 にリモートサイトの様子を示す。Fig. 14 (a) および Fig. 14 (b) は、それぞれ力帰還がない場合（強制的に  $u_{f1} = 0$  とした）と、力帰還がある場合の力の時間変化を示している。ただし、実線は操作力  $f_m$  を、破線は卵に加えられた力  $-f_s$  を示している。力帰還がない場合は、卵に過剰な力が作用して簡単に割れてしまった。一方、力帰還がある場合は、20 [N] ほどの力で卵を確実に把持できた。ただし、このときの通信遅れは 0.2~0.6 秒の間で変動していた。これを数名の被験者に対して行ったが、全員が確実に生卵を把持することができた。

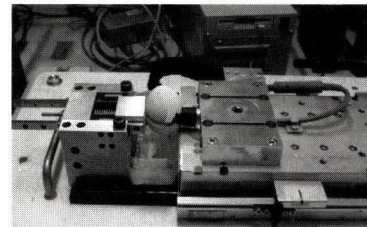


(a) Without force reflection

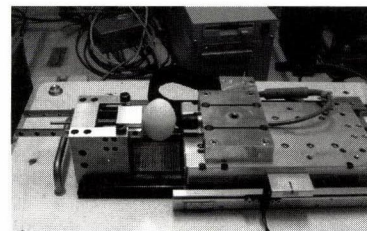


(b) With force reflection

Fig. 14 Experimental result when holding a raw egg



(a) Without force reflection



(b) With force reflection

Fig. 15 Photos of remote site

## 6. 結 論

本研究は、インターネットを介した力帰還型の遠隔操作系の構築を目的とし、周波数領域での設計が可能な  $H_\infty$  制御理論に基づきバイラテラル制御系の設計を行った。以下に得られた結果をまとめる。

1. 構築した実験システムは、ダイレクト駆動可能な直動型のマスタスレーブ、VxWorks が搭載された制御用ターゲットマシン、作業環境の画像提示システムなどから構成されている。約 50 [km] 離れたローカル・リモートサイト間で、インターネットを介した力帰還型遠隔操作の実証実験に成功した。
2. 実用的な観点から、数百 [msec] (1 秒以内) の往復通信遅れを想定した。遅れ要素をシステムへの摂動とみなし、オ

ンラインで観測される通信遅れに対応した時変の補償器を  $H_\infty$  ゲインスケジューリングの枠組みで設計した。また、マスタを可変インピーダンス制御することで、変動範囲内で見かけの摂動を同程度に小さく抑え、よりタイトな設計を行った。

3. 制御データの送受信に関しては、通信部が制御ループ内であることを考慮して、UDP/IP によるソケット通信が有効であることを示し、さらに適切な伝送周期および受信方法を選定した。また、画像データの圧縮・伝送に関しては、作業内容に応じてトラッキングエリアを設定し、注目しているエリア内を高画質、高更新周期とすることで、情報量の低減と操作性の向上を図った。
4. ネットワーク負荷により通信遅れがかなり変動し最大 800 [msec] の遅れが観察された。また、遅れは急激に変化しそのパターンも様々であった。しかし、遠隔操作は安定でかつ十分満足いく応答性を実現した。さらに、生卵を把持する実験にも成功した。提案する手法は、ネットワークを活用した遠隔操作系において非常に有用であり、複雑な作業に欠かせない力帰還が可能となり、幅広い利用が期待できる。

最後に、実験にご協力頂きました、岐阜県工業技術センター電子情報技術部長の多賀郁生氏、同主任専門研究員の丹羽義典氏、同技師の今井智彦氏（共同研究員）に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- [1] 内堀康弘, 小田光茂: “ETS-VII ロボット運用に見る力覚制御”, 第4回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.317-322, 1999.
- [2] C. Sayers: Remote Control Robotics. Springer-Verlag, 1998.
- [3] 近藤正幸ほか5名: “Computer Networked Robotics の最近の研究動向”, 日本機械学会第73期通常総会講演会資料集, vol.5, pp.357-369, 1996.
- [4] M. Mitsuishi, et al.: “A User-Friendly Manufacturing System for Hyper-Environments,” Proc. of the 1992 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.25-31, 1992.
- [5] Y. Wakita, S. Hirai and K. Machida: “Intelligent Monitoring System for Limited Communication Path: Telerobotic Task Execution over Internet,” Proc. of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.104-109, 1995.
- [6] Y. Kunii and H. Hashimoto: “Tele-Handshake Using Hand-Shake Device,” Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, vol.1, pp.179-182, 1995.
- [7] F. Arai, et al.: “Multimedia Tele-surgery Using High Speed Optical Fiber Network and Its Application to Intravascular Neurosurgery,” Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.878-883, 1996.
- [8] 横小路泰義: “テレロボティクス”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.7, pp.906-909, 1998.
- [9] R.J. Anderson and M.W. Spong: “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol.34, no.5, pp.494-501, 1989.
- [10] 小菅一弘, 村山英之, 竹尾光治: “ネットワークの通信条件の変化を考慮したバイラテラルマスタスレーブマニピュレータ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集, vol.B, pp.1309-1312, 1996.
- [11] G. Niemeyer and J.-J.E. Slotine: “Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet,” Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1909-1915, 1998.
- [12] 佐野明人, 藤本英雄: “マスタスレーブシステムの制御系設計の動向”, システム/制御/情報, vol.42, no.7, pp.356-362, 1998.
- [13] G.M.H. Leung, B.A. Francis and J. Apkarian: “Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via  $\mu$ -Synthesis,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.1, pp.105-116, 1995.
- [14] 藤本英雄, 佐野明人, 田中昌幸, 花井貴史: “バイラテラル制御系の分割設計と通信遅れによる不安定性の補償”, 日本機械学会論文集 C, vol.64, no.621, pp.1772-1779, 1998.
- [15] 佐野明人, 藤本英雄, 田中昌幸: “変動する通信遅れに対するゲインスケジュールド補償”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集 (CD-ROM), 2CI3-10(1),(2), 1998.
- [16] 松丸隆文, 川端俊一, 神徳徹雄, 松日楽信人, 小森谷清, 谷江和雄, 高瀬國克: “通信回線 ISDN を利用したロボットの遠隔操作 (作業に応じたデータの効率的伝送手法の検討)”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集 (CD-ROM), 2CI3-5(1),(2), 1998.
- [17] W.R. Stevens (篠田陽一訳): UNIX ネットワークプログラミング, トッパン, 1992.
- [18] D. Comer (村井純, 楠本博之訳): TCP/IP によるネットワーク構築 vol.1 (原理・プロトコル・アーキテクチャ), 共立出版, 1997.
- [19] 佐野明人, 藤本英雄, 岡本啓史: “トラッキングエリアを持った画像データの圧縮・伝送”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集 (CD-ROM), 1CV3-2(1),(2), 1998.
- [20] 遠藤俊明: “カラー静止画像の国際標準符号化方式”, インターフェイス, pp.160-203, 1991.



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1947年7月7日生。1970年名古屋大学工学部機械工学科卒業。現在、名古屋工業大学教授。2000年4月より工作・試験センター長を併任。生産システム、ロボットなどの知能化、バーチャルリアリティ・感性の工学などに興味を持つ。ASME 1998 Japan-USA Flexible Automation Symposium プログラム委員長。1997, 1998年 SICE 常務理事部門協議会議長。1997, 1998年日本機械学会評議員。1991, 1992年本学会誌編集委員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)



岡本啓史 (Keiji Okamoto)

1974年5月15日生。1997年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科生産システム工学専攻博士前期課程修了。同年松下通信工業(株)入社。



佐野明人 (Akihito Sano)

1963年2月8日生。1987年3月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年4月岐阜大学助手。1992年10月電気通信大学助手。1994年10月名古屋工業大学機械工学科講師。1998年5月助教授となり現在に至る。テレロボティクスの研究に従事。日本機械学会賞研究奨励賞受賞、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門賞(業績賞)受賞、日本機械学会、計測自動制御学会、精密工学会の会員。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)